

органической добавки углеродсодержащих компонентов обеспечивает появление во внутренней структуре окатышей дополнительного источника теплоты, которая будет способствовать интенсификации процесса нагрева как отдельных гранул, так и обжигаемого слоя в целом, что может обеспечить увеличение производительности обжиговой машины и сокращение удельного расхода топлива на 1,5–2,0 % (по данным предыдущих промышленных испытаний).

### Список использованных источников

1. Табунщиков Н.П. Производство извести. – М.: Химия, 1974. – 240 с.
2. Труфанов Д.В., Тарарыков О.Ю., Афанасов В.С., Труфанов АД. Новые наполнители из мела для промышленности строительных материалов России // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 88-89.
3. Роберт С. Байтон. Химия и технология извести. – М.: Стройиздат, 1972. – 240 с.

УДК 666.9.041:621.365.2:662.612.321/322

**И. В. Плесакин, Г. В. Воронов, И. В. Глухов**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДОЖИГАНИЯ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ СОВРЕМЕННОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

### Аннотация

*Современная промышленность требует постоянного улучшения металлургических агрегатов с точки зрения энергоэффективности и экологической безопасности. Содержание горючих компонентов в дымовых газах металлургических печей создает очевидные проблемы для промышленности, так как эти газы представляют собой угрозу для экологии, надежной службе огнеупорной футеровки элементов печи, а теплота сгорания компонентов не используется в технологическом процессе. В процессе решения вышеперечисленных проблем выделяется задача, которая актуальна для многих плавильных, нагревательных и термических печей со стадийным сжиганием топлива, технологических аппаратов для подготовки металлургического сырья, а именно дожигание горючих компонентов дымовых газов. В работе нами рассматривается вопрос о возможности обеспечения атмосферой дуговой сталеплавильной печи ДСП–120 возможности дожигания непосредственно в рабочем пространстве.*

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, дымовые газы, рабочее пространство, монооксид углерода, факел, дожигание, режим.

### Abstract

*Modern industry requires constant improvement of metallurgical units in terms of energy efficiency and environmental safety. The content of combustible components in the flue gases of metallurgical furnaces creates obvious problems for the industry, since these gases are a threat to the environment, reliable service of the refractory lining of furnace elements, and the heat of combustion*

*of the components is not used in the technological process. In the process of solving the above problems, a task is highlighted that is relevant for many smelting, heating and thermal furnaces with stage combustion of fuel, technological apparatus for the preparation of metallurgical raw materials, namely, afterburning of flammable components of flue gases. In this paper, we are considering the possibility of providing the atmosphere of the arc steelmaking furnace ДСП–120 with the possibility of afterburning directly in the working space.*

**Key words:** arc steel-smelting furnace, flue gases, working space, carbon monoxide, torch, afterburning, regime.

Дожигание горючих газов, содержащихся в атмосфере технологического аппарата, в каких-либо специальных устройствах, вынесенных из рабочего пространства печи, представляется неэффективным, поскольку требует капитальных затрат и не позволяет использовать теплоту дожигания непосредственно в тех печных агрегатах, где образуются эти компоненты и где нужны дополнительные источники энергии. Технология, включающая в себя дожигание горючих компонентов непосредственно в рабочем пространстве металлургических печей и как можно более полную передачу выделившегося тепла обрабатываемому материалу, является рациональной как с позиций энергосбережения, так и снижения вредных выбросов.

С теплотехнической точки зрения речь идет об организации сжигания СО в низкоскоростном высокотемпературном потоке весьма бедного (с низкой теплотой сгорания) топлива в большом объеме. В качестве окислителя для сжигания такого топлива рационально использовать кислород или кислородо-воздушную (КВС) смесь. Применение кислорода или КВС в качестве окислителя способствует рациональной организации процесса дожигания.

Одной из особенностей процесса горения окиси углерода (СО) в потоке кислорода (О<sub>2</sub>) является влияние концентрации паров воды (Н<sub>2</sub>О) и ряда других соединений водорода (Н<sub>2</sub>, ОН и др.) на его скорость. Например, Н.Н. Бекетов [1], Г. Диксон и другие авторы обратили внимание на плохую воспламеняемость смеси СО+О<sub>2</sub> в отсутствии влаги. Тщательное изучение (А.Р. Уббелоде [2], В. Бон и другие) этого вопроса привело к выводу о полной негорючести абсолютно сухой смеси СО+О<sub>2</sub> не содержащей водородных соединений.

Согласно Я.Б. Зельдовичу и Н.Н. Семенову [3, 4] скорость распространения пламени пропорционально корню квадратному из концентрации паров воды:

$$u_{\pi} \sim p_{H_2O} \approx \sqrt{p_{H_2O}}$$

Отмеченные особенности горения СО позволяют считать, что водяной пар и другие соединения водорода являются веществами, необходимыми не только для воспламенения СО, но и для дальнейшего развития процесса горения. Исследования свидетельствует о возможности эффективного дожигания СО в атмосфере конвертора струями О<sub>2</sub>, что подтверждает наличие водородных соединений в отходящих из зоны продувки газов. Присутствие водяного пара (Н<sub>2</sub>О) в смесях СО+О<sub>2</sub> ведет к образованию активных частиц, т.е. атомов и радикалов Н, О и ОН, обнаруженных при горении водорода.

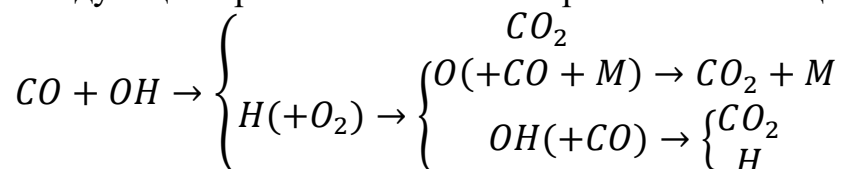
Исследованиями О.А. Есина и П.В. Гельда [5] установлено, что соотношение констант скоростей реакции  $O$  с  $O_2$  и  $CO$  составляет 40:1, свидетельствует о высоких скоростях протекания реакции:



где  $M$  – любая молекула, отводящая избыточную энергию при тройном соударении.

Так как гидроксил ( $OH$ ) является одним из промежуточных продуктов процесса горения, то присутствие частиц  $OH$  вызывает активную реакцию в цепи:  $OH + CO = CO_2 + H$ . Поскольку все элементарные превращения при горении  $CO$  непосредственно связаны с присутствием в газе водорода или его соединений, становятся понятными не воспламеняемость сухой смеси  $CO + O_2$  и тормозящее действие некоторых примесей практически необратимо связывающих  $H_2$ .

Процесс горения  $CO$  при высоких температурах (более 1000 К) можно представить в виде следующей простейшей схемы неразветвленной цепи [6]:



Из приведенной схемы следует, что скорость горения  $CO$  прямо пропорциональна концентрации  $CO$  и  $H_2O$  (пар). Очевидным является то, что цепной механизм процесса горения  $CO$  в струях кислорода, подаваемых над зоной продувки и навстречу потоку отходящих газов в конверторе, при температурах 1500÷2500 К и при стехиометрических соотношениях компонентов горения, не является лимитирующим.

Анализ термодинамических и теплофизических граничных условий в атмосфере дуговой сталеплавильной печи показал, что процесс для эффективного дожигания  $CO$  в потоке кислорода вполне достаточен и возможен.

По результатам расчета горения природного газа и элементного баланса по кислороду печная атмосфера рассмотренной плавки полностью обеспечивает условия для дожигания монооксида углерода в рабочем пространстве печи.

Объем и состав продуктов сгорания при  $\alpha = 2,5$  :

$$V_\alpha = 6,46 \text{ м}^3/\text{м}^3 ; CO_2 = 15,27\%, N_2 = 8,51\%, O_2 = 45,51\%, H_2O = 30,65\% .$$

Современная технология выплавки стали в ДСП сопровождается выделением из печи от 100 до 270 м<sup>3</sup>/ч на 1 тонну полупродукта. Общий объем выделения дымовых газов для ДСП–130 составляет 12–20 тыс. м<sup>3</sup> [7]. Примем выделение дымовых газов 100 м<sup>3</sup>/ч на 1 тонну полупродукта. Масса дымовых газов определяется по формуле:

$$m_{d,z} = V_{d,z} \cdot \rho_0^{d,z} \cdot \tau_{nl} ;$$

$$V_{d,z} - \text{количество дымовых газов, м}^3 ;$$

$$V_{d,z} = 100 \cdot 129,7 = 12970 \text{ м}^3/\text{ч} ;$$

$\rho_0^{d,z}$  – плотность дымовых газов, кг/м<sup>3</sup> (определяется по химическому составу дымовых газов);

$$\rho_0^{d,z} = 0,01 \cdot (\rho_{CO_2}^0 \cdot \{CO_2\} + \rho_{H_2O}^0 \cdot \{H_2O\} + \rho_{N_2}^0 \cdot \{N_2\} + \rho_{CO}^0 \cdot \{CO\}),$$

где  $\{CO_2\}, \{H_2O\}, \{N_2\}, \{CO\}$  – концентрации компонентов дымовых газов;

$\rho_{CO_2}^0 = 1,9768 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{H_2O}^0 = 0,768 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{N_2}^0 = 1,2505 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{CO}^0 = 1,14 \text{ кг/м}^3$  – плотности компонентов при нормальных условиях;

$$\rho_0^{\partial, z} = 0,01 \cdot (1,9768 \cdot 20,4 + 0,768 \cdot 15 + 1,2505 \cdot 53,6 + 1,14 \cdot 10) = 1,30 \text{ кг/м}^3;$$

Чтобы одновременно снизить концентрацию СО и количество избыточного  $O_2$  в дымовых газах, необходимо обеспечить их хорошее перемешивание в рабочем пространстве печи. Эту задачу можно частично решить за счет выбора оптимального угла наклона газокислородных и комбинированных горелок к горизонтальной и вертикальной поверхности, их рационального расположения по окружности печи, а также за счет установки фурм по дожиганию СО [8]. Данные мероприятия позволят обеспечить дожигание СО до  $CO_2$  в рабочем пространстве печи. Имеющийся опыт работы сталеплавильных агрегатов, использующих способ дожигания горючих газов потоками кислорода в атмосфере печи, содержащей СО и влагу в виде водяного пара, свидетельствует о возможности достижения наилучшего эффекта по дожиганию СО. Что будет происходить с выделением тепла для нагрева металла и шлака в ванне печи, что способствует достижению высоких технико-экономических показателей и в том числе с улучшенными теплотехническими показателями процесса плавки стали.

Анализ работы печи и состава печной атмосферы позволяет сделать вывод о том, что дожигание горючих компонентов, образующихся в процессе работы дуговой сталеплавильной печи, следует производить непосредственно в рабочем пространстве, используя технологический кислород с добавлением воздуха. Тепловая энергия от сжигания будет подаваться к ванне что в некоторой степени приведет к экономии энергии от горения дуги и горения топлива.

### Список использованных источников

1. Бекетов Н.Н. Избранные произведения по физической химии / Под ред. и вступ. статей Н.А. Измайлова. – Харьков. Изд-во Харьковского ун-та, 1955. – 276 с.
2. Уббелоде А. Р. Современная термодинамик // Успехи физических наук. 1938. Т. XX. Вып. 1. С. 29-83.
3. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980.
4. Зельдович Я.Б., Семенов Н.Н. Теория горения и детонации газов. – М.: Академия наук СССР ИХФ, 1944. – 70 с.
5. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1950. – 510 с.
6. Карпенко Г.А. О термических особенностях горения оксида углерода в атмосфере конвертора // Современные проблемы науки и образования. 2006. № 5. С. 39-40.
7. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора / Ю.Н. Тулуевский, И.Ю. Зинуров – Новосибирск: НГТУ, 2010. – 347 с.

8. Воронов Г.В., Гольцев В.А., Глухов И.В. Аэродинамика и тепловое состояние современной дуговой сталеплавильной печи // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2016. № 1. С. 28-34.

9. Кочнов М.Ю., Шульц Л.А., Кочнов Ю.М. Повышение эффективности дожига и охлаждения технологических газов крупнотоннажных дуговых сталеплавильных печей // Изв. вузов. Черная металлургия. 2009. № 11. С. 49-55.

10. Арсентьев П.П., Яковлев В.В., Комаров С.В. Конвертерный процесс с комбинированным дутьем. – М.: Металлургия, 1991. – 185 с.

11. Ибадуллаев Т.Б. Разработка и совершенствование технологии дожига в металлургических печах на основе математического моделирования с целью снижения вредных выбросов и энергозатрат. Автореферат. Москва – 2007.

12. Черменев Е.А., Меркер Е.Е., Коберник О.П. Об эффективности электроплавки стали при загрузке металлизированного сырья через трубчатые электроды в ванну дуговой печи // Бюллетень «Черная металлургия». 2013. № 5. С. 48-51.

УДК 669.5

**А. В. Плешкова, Г. В. Воронов**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ВЕЛЬЦ-ПЕЧИ**

### **Аннотация**

*В статье рассмотрена проблема утилизации отходов гидрометаллургического цикла. Приведены способы получения и востребованность окиси цинка. Рассмотрены особенности процесса вельцевания. Охарактеризованы технологические зоны вельц-печи: зона сушки и подогрева шихты, зона восстановления сульфатов, зона возгонки цинка, зона формирования клинкера. Рассмотрены конструктивные зоны печи: холодная и горячая зоны. Представлен материальный баланс вельц-процесса. Определены основные размеры печи, в том числе длины рассмотренных технологических зон, из условий регламентированной скорости движения газового потока внутри барабана печи, полноты удаления свободной и связанной влаги обрабатываемого материала, полноты протекания физико-химических преобразований. Для исследования тепловой работы вельц-печи выполнен тепловой баланс. Из расчета теплового баланса проанализирована тепловая работа при трех различных вариантах футеровки.*

**Ключевые слова:** вельц-печь, шихта, цинковый кек, клинкер, вельц-окись, материальный баланс, тепловой баланс, технологические зоны.

### **Abstract**

*The article explores hydrometallurgical waste utilization problem. Production methods and importance of zinc oxide are presented along with general information and Waelz kiln structures. The technological zones of the waelz furnace are characterized: the drying and heating zone of the charge, the sulfate reduction zone, the zinc sublimation zone, the waelz slag forming zone. The design zones of the furnace are considered: cold and hot zones. Then general charging material preparation principles are defined, waelz process characteristics and actions to get final products (waelz oxide and waelz slag) are described. Finally, waelz kiln heat and mass balances are presented along with*